

Global Energy Solutions e.V.
For Prosperity and Climate Neutrality

Kritische Rohstoffe

Kurzfassung

Dr. Wilfried Lyhs

7. Oktober 2022

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3
Abkürzungsverzeichnis	3
1. Kritische Rohstoffe und Strategien.....	4
1.1. Einleitung.....	4
1.2. Definition von kritischen Rohstoffen	5
1.3. Kernaussagen	6
2. Ausgewählte kritische Rohstoffe	7
2.1. Übersicht kritischer Rohstoffe.....	7
2.2. Seltene Erden (Lanthanide La ⁵⁷ – Yb ⁷⁰)	8
2.3. Nickel (Ni ²⁸)	9
2.4. Kupfer (Cu ²⁹)	11
2.5. Mangan (Mn ²⁵).....	12
2.6. Lithium (Li ³).....	13
2.7. Kobalt (Cobalt, Co ²⁷)	14
3. Rohstoffstrategien	15
4. Anwendungsfelder	16
4.1. Produktion von Magneten.....	17
4.2. Produktion von Brennstoffzellen.....	17
4.3. Bau von Hochleistungsspeichern	17
5. Reichweiten, Recycling, Urban Mining.....	17
5.1. Reichweitenschätzung.....	17
5.2. Recycling kritischer Rohstoffe	18
5.3. Urban Mining	18
Literaturverzeichnis	19

Versionsmanagement

Version	Änderungen	Datum
1.0	Kurzversion aus 1.0b (5.244)	20.09.22
1.1	Review durch BB	28.09.22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spezifischer Verbrauch von verschiedenen Mineralien in kg/Fahrzeug bzw. kg/MW für verschiedene Energieerzeuger; Quelle: IEA 2021	4
Abbildung 2: Anteil der Mineralien, die für die Technik im Bereich der erneuerbaren, sauberen Energietechnik gebraucht werden; Quelle: IEA 2021	5
Abbildung 3: Periodensystem der bedrohten Elemente, Quelle: (Pitts, 2011)	7
Abbildung 4: Bedarf an REE nach Endnutzungssektoren und Aufteilung des Bedarfs für Magnete nach Masse Status 2020; Quelle: Gielen IRENA (2022), S. 12.....	9
Abbildung 5: Produktion einiger Mineralien, die für die Energietransformation notwendig sind; Quelle: IEA (2021)	10
Abbildung 6: Nutzung verschiedener Mineralien für den Bau von Batterien für elektrische Fahrzeuge; Quelle: (IEA, 2021)	13
Abbildung 7: Rohstoffmengen in Li-Ion-Batterien nach Rohstoffen im Jahr 2015 und Prognosen für die Jahre 2020 und 2025; Quelle: Statista	14

Abkürzungsverzeichnis

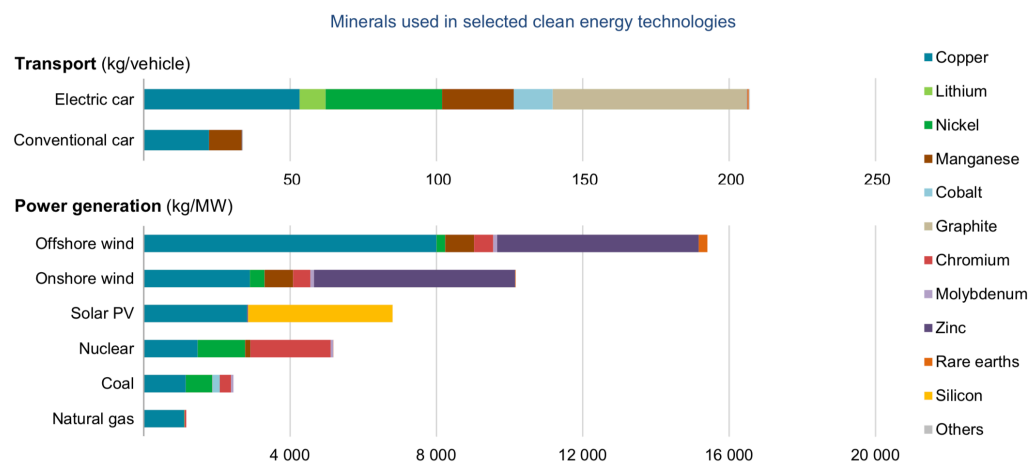
aUGP	aggregiertes Umweltgefährdungspotential
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
CFL	Compact Fluorescent Lamp ("Energiesparlampe")
CRM	Critical Raw Materials, kritische Rohstoffe
DERA	Deutsche Rohstoffagentur
DRK	Demokratische Republik Kongo
ERMA	European Raw Material Alliance
EV	Electro Vehicle, Fahrzeug mit Elektroantrieb s.a. BEV
FCC	Fuel Combustion Cell, Brennstoffzelle
GIZ	Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit
HREE	Heavy Rare Earth Elements: Yttrium ³⁹ , Gadolinium ⁶⁴ , Terbium ⁶⁵ , Dysprosium, Holmium, Erbium, Thullium, Ytterbium, Lutetium ⁷¹
Lanthanide	REE von Ordnungszahl 57 (Lanthan ⁵⁷) bis 71 (Lutetium ⁷¹)
LFL	Linear Fluorescent Lamp (LED Leuchte)
LMO	Lithium-Ion Mangan Oxid Batterie mit Elektroden aus LMO sind kostengünstig, ungiftig und bieten bessere thermische Stabilität
LREE	Light Rare Earth Elements: Scandium ²¹ , Lanthan ⁵⁷ , Cer ⁵⁸ , Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium ⁶³
NMC	Akkus mit Lithium, Nickel, Mangan und Cobaltoxid
PGM	Platinum-Group Metals: Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pr
REE, SEE	Rare Earth Elements, Seltene-Erden-Elemente
REO	Rare Earth Oxide, Mengenangabe von gefördertten oxydischen Metallen

RMIS	Raw Materials Information System, https://rmis.jrc.ec.europa.eu/
SDG	Sustainable Development Goals, vgl. https://sdgs.un.org/goals
SDS	Sustainable Development Scenario
TNO	Nederlandse Organisatie voor toegepast- natuurwetenschappelijk onderzoek (Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung)

1. Kritische Rohstoffe und Strategien

1.1. Einleitung

Die Transition hin zur Produktion von erneuerbarer Energie und zur Vermeidung von fossilen Energieträgern hat zur Folge, dass andere Materialien als in herkömmlichen Kraftwerken benötigt werden, um Energie zu erzeugen bzw. umzuwandeln und zu nutzen. Beispielsweise braucht ein elektrisches Fahrzeug etwa sechsmal mehr Mineralien als ein konventionelles Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, ein Windrad auf dem Land benötigt etwa neunmal mehr Mineralien als eine gasbefeuerte Anlage¹ (siehe Abbildung 1).



IEA. All rights reserved.

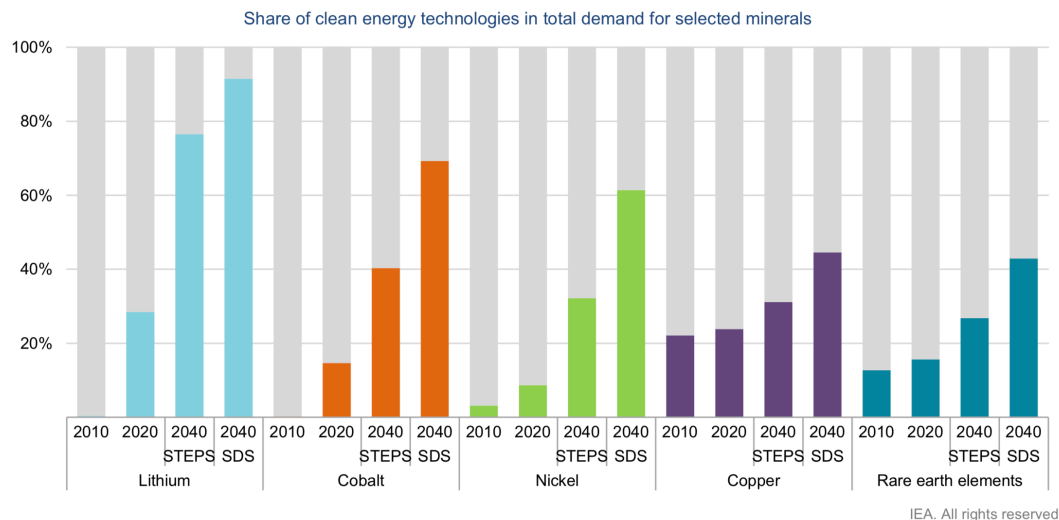
Notes: kg = kilogramme; MW = megawatt. Steel and aluminium not included. See Chapter 1 and Annex for details on the assumptions and methodologies.

Abbildung 1: Spezifischer Verbrauch von verschiedenen Mineralien in kg/Fahrzeug bzw. kg/MW für verschiedene Energieerzeuger; Quelle: IEA 2021

Die weltweit einsetzende Transition hat die Verhältnisse auf den Rohstoffmärkten der Welt verändert. Mit zunehmender Veränderung der Energieerzeugung (eigentlich „Umwandlung von Energie“) wurde dieser Sektor zum führenden Verbraucher von mineralischen Rohstoffen wie

¹ Vgl. (IEA, 2021)

Lithium, Kobalt, Nickel, Kupfer und den Seltenen Erden. Die Situation bei diesen Mineralien wird nachfolgend detaillierter beschrieben.



Notes: Demand from other sectors was assessed using historical consumption, relevant activity drivers and the derived material intensity. Neodymium demand is used as indicative for rare earth elements. STEPS = Stated Policies Scenario, an indication of where the energy system is heading based on a sector-by-sector analysis of today's policies and policy announcements; SDS = Sustainable Development Scenario, indicating what would be required in a trajectory consistent with meeting the Paris Agreement goals.

Abbildung 2: Anteil der Mineralien, die für die Technik im Bereich der erneuerbaren, sauberen Energietechnik gebraucht werden; Quelle: IEA 2021

Schon in der Zeit vor dem Krieg in der Ukraine und auch schon vor der Corona-Pandemie konnten steigende Rohstoffpreise an den Börsen der Welt beobachtet werden (siehe Abbildung 2). Die Corona-Pandemie hat die Situation dadurch extrem verschärft, dass in dieser Zeit zahlreiche Minen geschlossen wurden und jetzt mit hochfahrender Produktion der Bedarf nicht gedeckt werden kann. Die durch Schließung von Häfen und Blockade des Suezkanals verursachten Probleme in der Logistik verschärften ebenfalls diese Problematik.

Dies ist Anlass, die Bedeutung der sogenannten kritischen Rohstoffe und die möglichen Auswirkungen der Preissteigerungen in diesem Dokument zu untersuchen, zumal die Kenntnis der Verwendung einiger der zu dieser Gruppe von Elementen, Mineralien oder Rohstoffen gehörenden Produkte nicht als verbreitet vorausgesetzt werden kann.

1.2. Definition von kritischen Rohstoffen

Die Europäische Kommission hat ab dem Jahr 2011 Listen mit „kritischen Rohstoffen“ (CRM) herausgegeben, die beginnend mit 14 Materialien im Jahr 2011 auf mittlerweile 30 im Jahr 2020 angewachsen ist². „Als kritisch werden Rohstoffe bezeichnet, bei denen das Risiko eines Versorgungsengpasses in den nächsten zehn Jahren besonders groß ist und die als besonders wichtig für die Wertschöpfungskette betrachtet werden. Das Risiko von Versorgungsengpässen steht im Zusammenhang mit der Konzentration der Produktion auf einige wenige Länder und der geringen politischen und wirtschaftlichen Stabilität mancher Lieferanten. Zu

² Vgl. Europäische Kommission (2020) S. 20-24

diesem Risiko kommt bei einigen Mineralien erschwerend hinzu, dass der Rohstoff nur schwer ersetzt werden kann und seine Rückgewinnungsquote gering ist. Eine stabile Versorgungssituation ist allerdings eine wichtige Zielsetzung der Klimapolitik und der technologischen Innovation“³.

1.3. Kernaussagen

- Eine große und ständig wachsende Anzahl von Mineralien und chemischen Elementen kann als kritische Rohstoffe eingestuft werden.
- Im Fall von Lithium, Kobalt und den Seltenen Erden kontrollieren die drei größten Produzenten der Welt, allen voran China, drei Viertel des globalen Marktes⁴.
- Die zunehmende Nachfrage nach Rohstoffen, die für die Wende in der Mobilität und der Energieerzeugung und -versorgung benötigt werden, steht Problemen bei der Bereitstellung der Rohstoffe gegenüber, die einerseits durch die Corona-Pandemie verursacht wurden und andererseits auch durch die notwendige Vorlaufzeit für Exploration und den Aufbau der Produktions- und Logistikkapazitäten bedingt sind.
- Die Beschaffungskosten der Rohstoffe explodieren wegen des Missverhältnisses von Angebot und Nachfrage und durch die gestiegenen Produktionskosten von Rohstoffen mit Vorkommen in geringen Konzentrationen, wie z.B. im Fall der Seltenen Erden.
- Die Abhängigkeit der Industrienationen von kritischen Rohstoffen kann bei Konflikten zur politischen Erpressung genutzt werden.
- Auch wenn die globalen Probleme nur durch die Kooperation zwischen den Produzenten und Anwendern der kritischen Rohstoffe gelöst werden können, wird die Kontrollmöglichkeit über die kritischen Rohstoffe in einigen Ländern dazu genutzt werden, die eigene Position als Produktions- und Handelsmacht zum Nachteil anderer zu stärken.
- Wenn es nicht gelingt, die Abhängigkeit von den kritischen Rohstoffen zu verringern z.B. durch die Entwicklung von Substituten oder das Verbessern des Recyclings und dessen Ausweitung auf „Urban Mining“, dann ist die Energie- und Verkehrswende ernsthaft in Gefahr.

³ Vgl. Europäische Kommission CELEX 52011DC0025 DE TXT, S.2

⁴ Vgl. (IEA, 2021)

dem Ziel, die Supply Chain für die als kritisch erkannten Materialien zu sichern⁸ und hierbei auch eine Diversifizierung der Lieferanten zu erreichen.

2.2. Seltene Erden (Lanthanide La⁵⁷ – Yb⁷⁰)

„Die Seltenen Erden (REE) sind eine Familie von 16 Elementen (die Elemente Scandium²¹ und Yttrium²⁹ wurden hierbei mitgezählt), die als Gruppe ausgeprägte chemische Ähnlichkeiten aufweisen, während sie als einzelne Elemente unverwechselbare und vielfältige elektronische Eigenschaften besitzen. Diese atomistischen, elektronischen Eigenschaften sind außerordentlich nützlich und motivieren die Anwendung der Seltenen Erden in vielen Technologien und Geräten. Die zunehmende Einbindung und Abhängigkeit der REE in die Technologie hat Bedenken hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit geweckt und zu neueren Studien über verbesserte Trennverfahren motiviert, um eine Kreislaufwirtschaft für EE zu erreichen“⁹. Seltene Erden haben einzigartige elektronische, optische, lumineszierende und magnetische Eigenschaften, die sie für ein breites Spektrum von Produkten und Anwendungen von entscheidender Bedeutung machen. So werden Seltene Erden beispielsweise als Katalysatoren, in der Fertigung, in der Medizin, in Keramiken und Gläsern verwendet. Sie sind von grundlegender Bedeutung für die Erzeugung von sauberer Energie und - allgemeiner noch - für den Übergang des Zeitalters der fossilen Brennstoffe zum Niedrig-Kohlenstoff-Zeitalter (Abbildung 4).

„Obwohl es genügend bekannte Seltene Erden-Ressourcen gibt, um den gesamten Bedarf der Energiewende zu decken, besteht die größte Herausforderung darin, den Abbau und die Verarbeitung über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg entsprechend des Nachfragewachstums auszuweiten.“¹⁰

Die Nachfrage nach Seltenen Erden wie Dysprosium, Neodym, Praseodym, die für die Fertigung von starken, temperaturbeständigen Magneten in Generatoren und Motoren benötigt werden, wird in den nächsten Jahren auf das Doppelte bis Dreifache steigen.

Aber auch die Nachfrage nach Europium und Terbium für CFLs und LFLs für Leuchtmittel wird weiter rasant ansteigen.

Eine Unabhängigkeit von der Dominanz der chinesischen Lieferanten von Seltenen Erden zu erzielen, scheint zumindest kurzfristig unmöglich. Derzeit gibt es weltweit nur sieben größere Anlagen, die Seltene Erden bearbeiten, wovon sich sechs in China und eine in Malaysia befinden.

⁸ Vgl. (Gielen, D., Lyons, M. (IRENA), 2022)

⁹ Übersetzung aus (Cheisson & Schelter, 2019)

¹⁰ Übersetzung aus (Gielen, D., Lyons, M. (IRENA), 2022), S.6

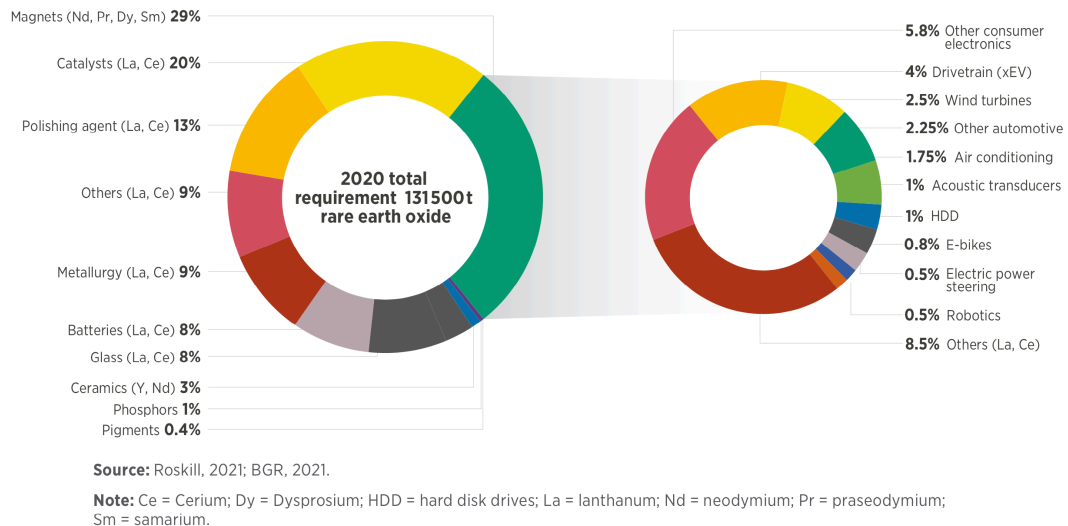


Abbildung 4: Bedarf an REE nach Endnutzungsektoren und Aufteilung des Bedarfs für Magnete nach Masse, Status 2020; Quelle: Gielen IRENA (2022), S. 12

Der US Geological Survey geht von erschlossenen Reserven der Seltenen Erden in der Höhe von 137 Mt aus. Die unerschlossenen Ressourcen werden zu 308 Mt angegeben, was bei Fortschreibung der heutigen Verbrauchsdaten bei den Reserven noch 1100 Jahre reichen würde. „Neben den natürlichen Ressourcen enthalten bestimmte Rückstände wie Rotschlamm (aus der Aluminiumherstellung), Flugasche aus der Kohleverbrennung und Gips (aus der Kohleverstromung) erhebliche Mengen an Seltenen Erden, die zurückgewonnen werden können“¹¹. Trotz ihres seltenen Vorkommens betrug die Recyclingrate der Seltenen Erden bisher weniger als 1 %¹².

Das Problem des Urban Minings von SEE in z.B. ausrangierten Handys, Bildschirmen, Energiesparlampen und Autos ist, dass die SEE in diesen Produkten fein verteilt sind. Effiziente und umweltverträgliche Verfahren zur Extraktion von SEE wurden kürzlich entwickelt und zur industriellen Anwendung gebracht¹³. Andere, basierend auf dem Einsatz von Bakterien oder natürlichen Proteinen, sind noch in der Entwicklung¹⁴.

2.3. Nickel (Ni²⁸)

Obwohl Nickel nicht auf der Liste der kritischen Stoffe der EU und auch nicht auf der der amerikanischen Industrie steht, ist das Übergangsmetall heute als kritischer Rohstoff anzusehen, da der Gesamtanteil des Imports aus Russland etwa 40% (Stand 2019¹⁵) beträgt und die Kritikalität bedingt durch den russischen Überfall auf die Ukraine in den Listen noch nicht berücksichtigt worden war.

¹¹ Übersetzung aus (Gielen, D., Lyons, M. (IRENA), 2022), S.7

¹² Vgl. (Daumann, 2018)

¹³ ebd

¹⁴ Vgl. (Dong & Mattocks, 2021)

¹⁵ Vgl. (Neitzel, Was tun gegen die Abhängigkeit von russischen Rohstoffen?, 2022)

Erfreulicherweise ist Russland nicht der einzige und auch nicht der größte Produzent von Nickel, sodass eine sehr gute Chance besteht, Lieferengpässe zu vermeiden. Bei Statista werden für das Jahr 2021 auch Kanada (Ausfuhr von Nickel im Wert von 3,6 Mrd USD) und USA (2,2 Mrd USD) vor Russland (2 Mrd USD) genannt. Allerdings werden große Anteile der geförderten Nickelerze in China aufgearbeitet (siehe Abbildung 5), sodass wie bei den Seltenen Erden auch eine Abhängigkeit zu einem geopolitisch unsicheren Land entsteht.

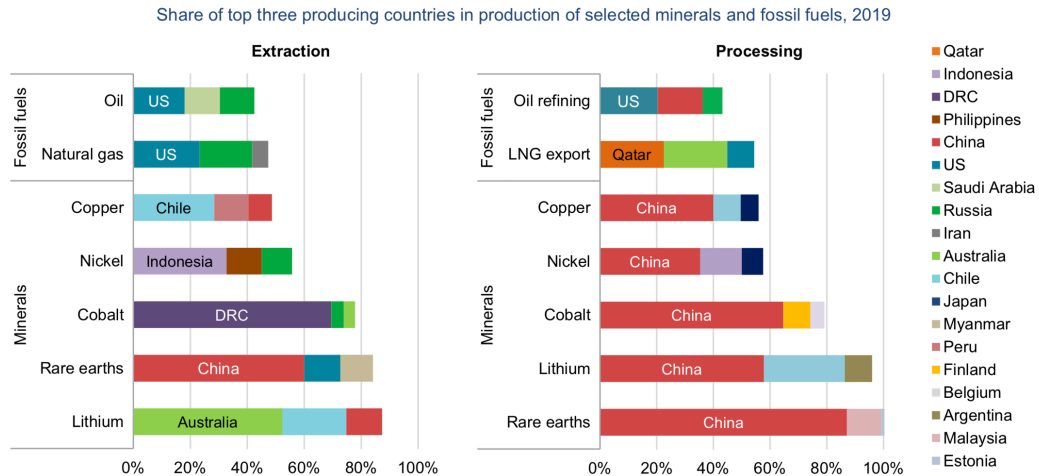


Abbildung 5: Produktion einiger Mineralien, die für die Energietransformation notwendig sind; Quelle: IEA (2021)

Bei der Produktion von Elektrofahrzeugen spielen neben Seltenen Erden auch, Lithium, Kobalt und Nickel eine entscheidende Rolle. Die IEA erwartet, dass der Bedarf an diesen Mineralien in den nächsten Dekaden um 60 – 70% weiter steigen wird¹⁶, wie er es in den vergangenen Jahren ja bereits getan hat.

Bei den am häufigsten eingesetzten Akku-Typen (NCA: Nickel Cobalt Aluminium und NMC: Nickel Mangan Cobalt) werden 80% bzw. 33% Nickel eingesetzt.

Nickel wird auch in Li-Ion-Akkus verbaut, um höhere Energiedichten und höhere Speicherkapazitäten d.h. höhere Reichweiten bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen bei geringeren Kosten zu ermöglichen¹⁷.

Die Konstruktion alkalischer Elektrolyseure benötigt „Nickel in Mengen von mehr als einer Tonne pro MW oder 1.000 Tonnen für eine 1-GW-Elektrolyseur-Anlage, was eine heute avisierte Größe von Elektrolyseuren ist. Es wird erwartet, dass der Nickelbedarf für alkalische Elektrolyseure sinkt, aber es ist nicht zu erwarten, dass Nickel bei zukünftigen Konstruktionen komplett entfallen wird. Wenn jedoch der heutige Stand der Technik mit einem Verbrauch von ca. 800 kg/MW repräsentativ für den künftigen Bedarf wäre und selbst wenn alkalische Elektrolyseure den Markt

¹⁶ Vgl. (IEA, 2021) S. 5)

¹⁷ <https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/nickel-in-batteries/>

dominieren, dann würde die Nickelnachfrage für Elektrolyseure viel niedriger bleiben als die für Batterien im SDS. Sollten in einem solchen Fall jedoch die Nickelpreise aufgrund von Herausforderungen in der Batterielieferkette stark ansteigen, würden sich die Kosten für Elektrolyseure ändern.“¹⁸

Durch den mit der Elektrifizierung stark ansteigenden Bedarf an Nickel zur Produktion von Akkumulatoren/Batterien und Elektrolyseuren, kann ein Engpass an diesem Übergangsmetall auf dem Weltmarkt entstehen. Das Recycling von Nickel wird als einer der effizientesten Wiederverwendungsprozesse betrachtet¹⁹. Das Nickel Institute schätzt, dass 68% des in Produkten enthaltenen Nickels recycelt wird (Stand 2010). Weitere 15% werden durch den Stahlkreislauf wiederverwendet und nur 17% landen auf der Müllkippe. Nickel kann aus Edelstählen durch Recycling gewonnen werden und mittlerweile wird auch von Verfahren berichtet, mit denen Nickel aus Nickel-Cadmium- Batterien wiederverwendet werden kann²⁰.

Es wird erwartet, dass die Nutzung nickelhaltiger Li-Ion-Akkus in den nächsten 20 Jahren sehr stark zunehmen wird, sodass das Recycling von Akkus immer wichtiger werden wird.

Auch bei Nickel sind die Zukunftsaussichten für „Urban Mining“ sehr gut, da in vielen Ländern der Abfall mehr Anteile an wertvollen Metallen enthält als in lokal vorkommenden Erzen.

2.4. Kupfer (Cu²⁹)

Die höchsten Produktionsmengen von Kupfer werden von Chile (5.600 kt im Jahr 2021) und Peru (2.200 kt im Jahr 2021) erzielt, gefolgt von China (1.800 kt) und DRK Kongo (1.800 kt).

Kupfer wird auch als das „Metall der Elektrifizierung“ bezeichnet, da alle Bereiche von der Energieerzeugung, über den Transport der Energie und die Transformation der Elektrizität in Fortbewegung, mechanischer Arbeit oder Wärme ohne Kupfer nicht denkbar sind. Wegen seiner hervorragenden Leitfähigkeit von Strom wird der überwiegende Teil der Kupferproduktion für Kabel und Elektro eingesetzt wie z.B. in den Wicklungen der Generatoren und Elektromotoren. Aus Abbildung 1 ist der Anteil von Kupfer bei der Energieerzeugung zu entnehmen: 8.000 kg/MW bei Offshore und ca. 3.000 kg/MW bei Onshore Wind und PV. Laut eines S&P-Global-Berichts²¹ benötigt die Energieproduktion durch Solarkraftwerke doppelt und die Offshore-Windkraft fünfmal mehr Kupfer pro Megawatt installierter Leistung als bei klassischer Erzeugung mit Erdgas oder Kohle. Der Bedarf an Kupfer beträgt heute 25 Mt/a und wird bis 2035 auf 50 Mt/a steigen und bis 2050 auf 53 Mt/a weiter anwachsen²². Trotz angenommener Verbesserung der Nutzungs- und Recyclingeffizienz

¹⁸ Übersetzung aus IEA(2021) S. 112

¹⁹ Vgl. (Nickel recycling, 2022)

²⁰ Vgl. (Espinosa & Tenório, 2006)

²¹ Vgl. (S&P_Global, 2022)

²² ebd

besagen Modellrechnungen, dass im Jahr 2035 eine Menge von etwa 10 Mt/a fehlen wird, um das Net-Zero Ziel zu erreichen.

„Im 21. Jahrhundert könnte die Kupferknappheit zu einer zentralen destabilisierenden Bedrohung der internationalen Sicherheit werden. Die prognostizierten jährlichen Engpässe werden die Versorgungsketten in einem noch nie dagewesenen Maße belasten. Die Herausforderungen, die sich daraus ergeben, erinnern an den Kampf um Öl im 20. Jahrhundert, könnten aber durch eine noch stärkere geografische Konzentration der Kupferressourcen und der nachgelagerten Industrie, die das Kupfer zu Produkten veredelt, zunehmen.“²³

Kupfer wird in Deutschland zu circa 50%²⁴ recycelt, weltweit sind es nur circa 33%. Mit einer durchschnittlichen Lebensdauer der Kupferprodukte von ca. 33 Jahren und den Produktionskapazitäten ergibt sich ein Anteil von wiederverwendetem Kupfer von ca. 80%²⁵.

2.5. Mangan (Mn²⁵)

Mangan ist ein sprödes Übergangsmetall, das in einigen Eigenschaften dem Eisen ähnelt. In der Stahlerzeugung wird Ferromangan als Legierungsbestandteil eingesetzt und entzieht dem Stahl Sauerstoff und Schwefel und verbessert hierdurch die Durchhärtung des Stahls. In Alkali-Mangan-Batterien wird Mangan als Kathode verwendet. Aber auch in Li-Ion-Batterien wird Mangan verbaut. Der Anteil von Mangan bei der Stromerzeugung ist der Abbildung 1 auf S.4 zu entnehmen.

Die Länder mit den höchsten Fördermengen von Mangan sind China, Südafrika, Australien und Gabun. Auch hier ist wieder China der größte Produzent von Mangan.

Etwa 60% des Meeresbodens sind mit Manganknollen bedeckt²⁶. Das Vorkommen wurde auf insgesamt 10 Gt (Mrd Tonnen) geschätzt jedoch wegen der unklaren Auswirkung des Abbaus auf die ökologischen Verhältnisse und der hohen Förderkosten eingestellt²⁷.

²³ Übersetzung aus (S&P_Global, 2022), S. 9

²⁴ Vgl. (Kupferinstitut, 2021)

²⁵ Vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Recycling>

²⁶ Vgl. <http://manganknollen.info/vorkommen.html>

²⁷ ebd

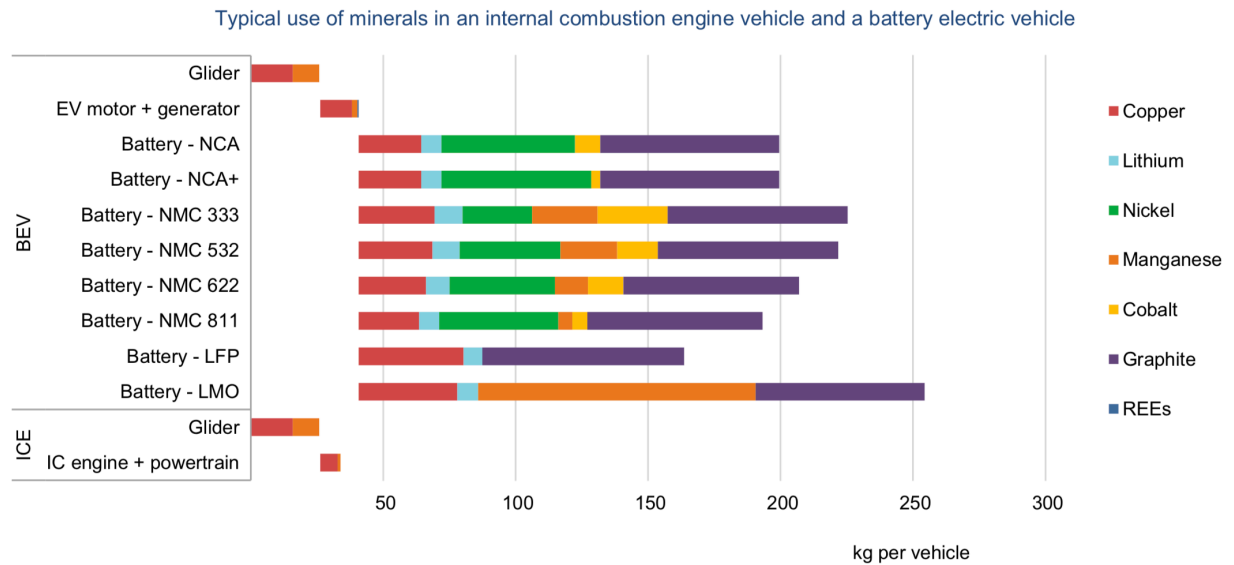


Abbildung 6: Nutzung verschiedener Mineralien für den Bau von Batterien für elektrische Fahrzeuge; Quelle: (IEA, 2021)

Aus Abbildung 6 ist die besondere Bedeutung von Mangan für den Bau von NMC- und LMO-Batterien zu erkennen. Gerade bei den für die Elektromobilität benötigten LMO-Akkus werden ca. 100 kg/BEV verbaut. Wegen des enorm steigenden Bedarfs an Mangan im Bereich der Hochleistungsspeicher wird der Bedarf an Mangan von etwa 11.140 t im Jahr 2018 auf 461.300 t also um mehr als das Vierzigfache im Jahr 2040 ansteigen²⁸.

Bei den Statistiken zu Recyclingraten taucht Mangan noch nicht auf. Es ist allerdings damit zu rechnen, dass mit dem Ausbau des Batterierecyclings auch die Recyclingraten von Mangan zunehmen werden.

2.6. Lithium (Li³)

Lithium ist ein Alkalimetall, das entweder bergmännisch abgebaut wird (Einsatz von hoher Energie und chemischen Prozessen) oder aus einer Sole mit Verunreinigungen von Magnesium und Sulfaten gewonnen wird (z.B. Atacama mit Einsatz von Sonnenenergie).

Die Verkehrswende hin zu Elektroautos hat den Bedarf nach Materialien, zu denen insbesondere wegen der Akkus auch Lithium gehört, enorm befeuert. Seit dem Jahr 2020 ist auch Lithium in der EU ein kritischer Rohstoff, da einige Kalkulationen für die Jahre 2030 bzw. 2050 einen 18 bzw. 60-mal höheren Lithium-Bedarf für die Herstellung von E-Autos und Energiespeicher vorhersagen als im Jahr 2020.

Lithium wird in Li-Ion-Akkumulatoren eingesetzt mit einem Verbrauch von etwa 120-180 g Li/kWh. Abbildung 7 zeigt, dass für alle Mineralien, die für die Produktion von Akkumulatoren wichtig sind, aber insbesondere für Lithium ein starker Mehrverbrauch erwartet wird.

²⁸ Vgl. Statista 2022

Derzeit gibt es noch keine Zahlen zum Recycling von Lithium. Mit vermehrten Anmeldezahlen für elektrische Fahrzeuge steigt auch der Bedarf, die darin verwendeten Rohstoffe insbesondere Lithium, Nickel und Kobalt aus der Batterie wiederzuverwenden. So baut BWM zusammen mit dem chinesischen Partner Brilliance gerade das Recycling für die in den Fahrzeugen der Marke verbauten Akkus auf²⁹ mit dem Ziel, aus 100 kWh-Akkus etwa 90 kg Ni, Li und Co zurückzugewinnen. Da der Markt für elektrische Fahrzeuge in China stärker wächst als in Europa und die Autobauer außerdem gesetzlich verpflichtet sind, die Rückholung der Akkus zu gewährleisten, wird damit gerechnet, dass bis zum Jahr 2025 etwa 780.000 t an ausgemusterten Batterien bei den Recyclingunternehmen anfallen werden.

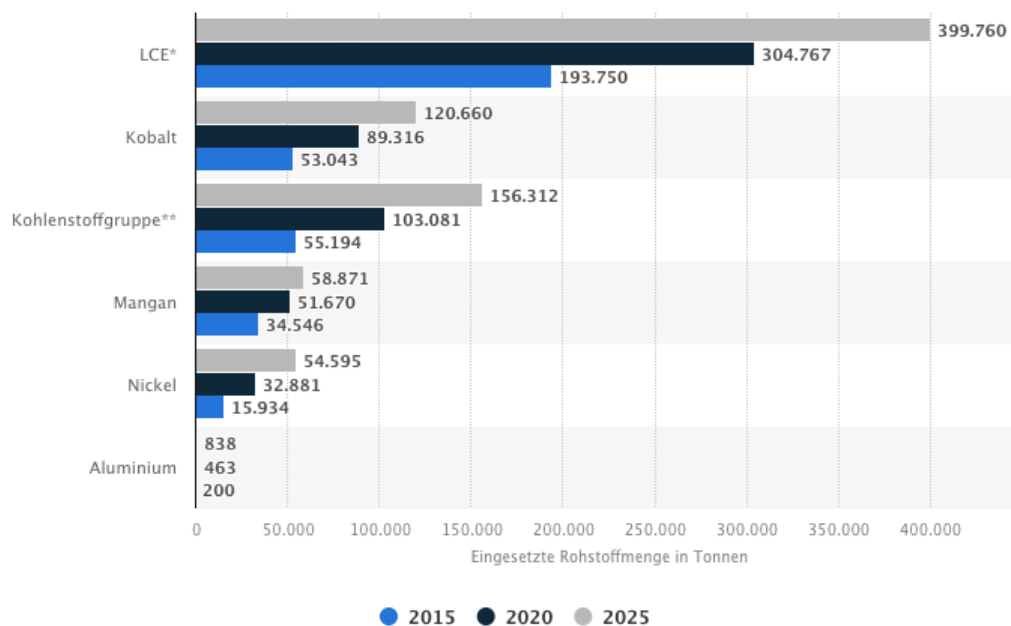


Abbildung 7: Rohstoffmengen in Li-Ion-Batterien nach Rohstoffen im Jahr 2015 und Prognosen für die Jahre 2020 und 2025; Quelle: Statista³⁰

2.7. Kobalt (Cobalt, Co²⁷)

Kobalt ist ein ferromagnetisches Übergangsmetall und im Periodensystem wegen seines Atomgewichts zwischen Eisen und Nickel angeordnet. Es leitet Wärme und elektrischen Strom gut. Kobalt ist für die Produktion von Akkus (Batterien) insbesondere von denen mit geringen Abmessungen (z.B. bei Mobiltelefonen) von großer Bedeutung, der größte Exporteur von Kobalt ist die Demokratische Republik Kongo (DRK).

Für die Anoden von Lithium-Akkus werden mittlerweile andere Materialien mit geringem Anteil von Kobalt verwendet (NMC-Nickel, Mangan, Cobalt

²⁹ <https://www.technik-einkauf.de/rohstoffe/bmw-recycelt-nickel-lithium-und-kobalt-aus-e-auto-batterien-528.html>

³⁰ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/998867/umfrage/rohstoffmengen-in-lithium-ionen-batterien-nach-rohstoffen-weltweit/>

mit z.B. nur 2,8% Co bei den Tesla Akkus), sodass für die Akkus von Fahrzeugen nicht mehr so viel Kobalt benötigt wird.

Auch wenn Kobalt als wichtiger Rohstoff für die Entwicklung der westlichen Welt nicht in China abgebaut wird, so wird doch ein großer Anteil der Produktion in Kongo zur Weiterverarbeitung nach China exportiert³¹, sodass der Handelspartner für Kobalt wieder China ist. Die hohen Exportraten von Kongo ins Nachbarland Sambia deuten darauf hin, dass in Sambias Copperbelt die Erze aus dem Kongo zusammen mit der eigenen Produktion verhüttet werden.

Obwohl die sicheren Vorräte an Kobalt 25 Mt betragen und unter dem Meer noch einmal 120 Mt³² vermutet werden, betrachtet die Wirtschaftswoche die Verfügbarkeit von Kobalt als dramatisch, da die Lagerstätten im politisch „extrem instabilen Südkongo“ liegen, die Exploration Milliarden verschlingt und zudem risikoreich ist. Die Jahresproduktion des Kongo beträgt 124 Mt Kobalt und der Jahresbedarf für 30 Mio BEV mit 90 kWh Akku (Plan der Autoindustrie für die Jahresproduktion in naher Zukunft) beträgt 400 Mt. D.h. der Bedarf ist mehr als doppelt so hoch wie das aktuelle Angebot. Wenn es nicht gelingt, Kobalt durch andere Materialien im Akku zu ersetzen, dann ist die Energiewende ernsthaft gefährdet. Verglichen mit den Recyclingraten bei Seltenen Erden in der Gruppe der Lanthaniden und bei den leichten Elementen Lithium und Beryllium kann das Recycling der Ferrometalle, zu denen auch Kobalt gehört, schon als weit fortgeschritten betrachtet werden³³.

3. Rohstoffstrategien

In der Literatur sind Beschreibungen von Rohstoffstrategien verschiedener Länder wie Deutschland³⁴, der EU³⁵, den USA, Großbritannien, Japan oder China bekannt³⁶. Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei den Strategien lassen sich wie folgt zusammenfassen³⁷:

- Deutschland, die EU, China und die USA fördern die Entwicklung und Produktion von kritischen, metallischen Rohstoffen im Inland.
- China und Japan unterhalten Bevorratungssysteme für kritische, industrierelevante Rohstoffe. Die USA hat nur für den militärischen Bereich ein Bevorratungssystem.
- China und Japan treiben mit nationalen Unternehmen und massiver finanzieller Unterstützung (Kredite, Bürgschaften) die Entwicklung von und die Beteiligung an Rohstoffprojekten im Ausland voran.

³¹ Vgl. (Neitzel, Kritische Rohstoffe - der große Überblick, 2021)

³² Vgl. Wirtschaftswoche „bremsen Rohstoffengpässe das Elektroauto aus?“ <https://www.wiwo.de/technologie/mobilitaet/lithium-und-kobalt-nach-dramatischer-ist-die-lage-bei-kobalt/20560144-3.html>

³³ Vgl. (Buchert, 2018)

³⁴ Vgl. (BMW, 2019), (Bundesregierung, 2020)

³⁵ Vgl. (Commission, 2020), (Kommission, 2011) (Minke, 2021)

³⁶ Vgl. (The Hague Centre for Strategic Studies (HCSS) and TNO, 2010).

³⁷ Vgl. (Steinmüller, 2020)

- Deutschland unterstützt seine Industrie bei Auslandsaktivitäten im Rohstoffbereich mit Instrumenten der Außenwirtschaftsförderung wie Kredite und Bürgschaften. Staatliche Maßnahmen der ersten Rohstoffstrategie, wie die Explorationsförderung und strategische Rohstoffpartnerschaften mit verschiedenen Ländern sind gescheitert oder haben nicht die gewünschten Ergebnisse erzielt.
- Alle Länder unterstützen mit Nachdruck das Recycling und die Wiederverwertung von metallischen Rohstoffen und arbeiten auf eine Kreislaufwirtschaft hin.
- Deutschland, die EU, China und Japan zielen auf eine starke Einbeziehung von ökologischen und sozialen Aspekten in der nationalen und internationalen Rohstoffgewinnung sowie auf eine Stärkung der Nachhaltigkeit in Liefer- und Wertschöpfungsketten ab.
- Besonders Deutschland, die EU und die USA setzen sich dafür ein, dass der Handel mit Rohstoffen weltweit offenbleibt und die Transparenz im Handel verbessert wird.
- Deutschland, die EU, Japan und die USA führen Forschungsprojekte bezüglich Exploration, Bergbau, Aufbereitung und Weiterverarbeitung von kritischen Rohstoffen durch.
- Deutschland, die EU und die USA favorisieren den freien Markt und Handel. Deutschland und die EU fördern mit ihren Rohstoffstrategien weltweit die Nachhaltigkeit in der Rohstoffgewinnung und des Lieferkettenmanagements im Rohstoffbereich. China ist seit einigen Jahren mit Nachdruck dabei, die Nachhaltigkeit seiner Rohstoffindustrie im Ausland und ihrer Lieferketten zu verbessern.
- China und Japan unterstützen mit staatlichen Maßnahmen massiv ihre zumeist vertikal integrierte Industrie bei Auslandsaktivitäten im Rohstoffbereich.

4. Anwendungsfelder

Das hohe Versorgungsrisiko bei Seltenen Erden wirkt sich auf Motoren für Windkraftwerke und Antriebsmotoren aus, was bei erneuerbaren Energien und E-Mobilität zu Behinderungen in Entwicklung und Ausbau führen kann. Aber auch die Rohstoffe mit moderatem Versorgungsrisiko wie z.B. Kobalt, Metalle aus der PGM-Gruppe und Graphit haben massiven Einfluss auf die Produktion von Akkus, Brennstoffzellen und auf den dringend notwendigen Aufbau einer Elektrolyseur-Produktion, um mit Hilfe von erneuerbar erzeugtem Strom grünen Wasserstoff zu erzeugen. Die Produktion von erneuerbarem Strom ist nicht nur bei der Windkraft sondern auch in der Photovoltaik gefährdet, da Materialien zum Bau der PV-Module mit einem wenn auch noch geringem Versorgungsrisiko versehen sind.

4.1. Produktion von Magneten

Überall dort, wo Strom durch Drehbewegungen erzeugt oder mit seiner Hilfe Drehbewegungen initiiert werden, werden starke Magnete benötigt, die auch bei Erhitzung des Aggregats während des Einsatzes ihr magnetisches Moment nicht verlieren. Die Hersteller von Elektrofahrzeugen (EV) haben die starke Abhängigkeit von Seltenen Erden erkannt und versuchen diese bei der Motorenentwicklung durch modifiziertes Design zu verringern. Bislang geht das allerdings auf Kosten der Reichweite von EVs, sodass die Suche nach Ersatzwerkstoffen für die Lanthanide weitergeht.

4.2. Produktion von Brennstoffzellen

Da Brennstoffzellen (FCC) im Gegensatz zu Wärmekraftmaschinen in der Lage sind, Energie aus Brennstoffen, ohne den Umweg der Erzeugung von Wärme in elektrischen Strom umzuwandeln, sind sie potenziell effizienter als Wärmekraftmaschinen.

Damit in Brennstoffzellen elektrochemische Reaktionen stattfinden können, sind deren Elektroden mit Katalysatoren beschichtet, vorwiegend Platin, Ruthenium oder Palladium bzw. Gemische von diesen Elementen. Auch Nickel, Nickeloxide, Wolframcarbide und -sulfid werden eingesetzt.

4.3. Bau von Hochleistungsspeichern

Wann immer es durch Erneuerbare zu einer Überproduktion von Strom kommt, die durch hohe installierte Kapazitäten von Wind- und Solaranlagen hervorgerufen werden, ist das kurz- und mittelfristige Speichern von nicht nutzbarem Strom sinnvoll. Eine Möglichkeit hierzu besteht im Aufbau von Lithium-Ionen-Speichern. Hierbei tritt ein hoher Bedarf an Nickel, Mangan, Lithium und Kobalt und besonders an Graphit auf.

5. Reichweiten, Recycling, Urban

Mining

5.1. Reichweitenschätzung

Bei den Reichweiten, d.h. der Anzahl Jahre, die ein Mineralvorkommen bis zur Erschöpfung noch ausreicht, unterscheidet man zwischen dem statischen Paradigma, bei dem davon ausgegangen, dass die Ressourcen auf der Erde fix sind und ihre Größe in der Regel gut geschätzt werden kann, und dem dynamischen Paradigma, bei dem versucht wird, die

Neuentdeckung von Vorkommen und die Marktentwicklungen bei der Berechnung der Reichweite mit einzubeziehen.

Bei beiden Paradigmen sind die Schätzungen teilweise spekulativ und ihre Genauigkeiten variieren von Element zu Element.

Tatsächlich werden permanent neue Vorkommen gefunden oder bekannte durch zwischenzeitlich entwickelte Techniken oder veränderte Marktpreise plötzlich abbaubar und können den Ressourcen zugerechnet werden. Eine dynamische Analyse der Verfügbarkeiten oder Reichweiten von Ressourcen muss daher deutlich mehr Parameter wie z.B. Regularien in Geschäfts- und umweltrelevanten Prozessen, Entwicklung von Recycling-Verfahren berücksichtigen als für die statische Analyse notwendig wäre.

5.2. Recycling kritischer Rohstoffe

Nach Angaben der EU sind mittlerweile die Raten für Eisen, Zink und Platin grösser als 50% und die Sekundärrohstoffe dieser Metalle decken über ein Viertel des Verbrauchs in der EU. Spitzenreiter bei den Recyclingraten der Nicht-Eisen-Metalle sind Wolfram (42%), Europium (38%) und Yttrium (31%). Platin, Kobalt und Titan werden zu 25%, 22% und 19% recycelt.

Es sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass in vielen Ländern informell arbeitende Abfallsammler (z.B. „pepenadores“, „catadores“, „waste pickers“) unterwegs sind, die, um ihren Lebensunterhalt zu sichern, den Müll sortieren und recyceln. Ihre Anzahl wird auf 15 – 50 Millionen Menschen geschätzt, die zwar keine komplexe Hydrometallurgie durchführen können, aber mit sicherem Blick schon einmal die wertvollen Abfälle vorsortieren und der professionellen Aufarbeitung zuführen.

Die deutsche GIZ unterstützt in Projekten die Erarbeitung von nationalen und lokalen Plänen zur Abfallwirtschaft³⁸, die Einbindung der informellen Abfallsammler und den Aufbau von Know-how für die Abfall- und Kreislaufwirtschaft.

5.3. Urban Mining

In den letzten Jahren hat sich der Begriff „Urban Mining“ für die Bemühung etabliert, aus dem „anthropogenen Lager“ von etwa 50 Gt in Deutschland mit einer Zuwachsrate pro Kopf von 10 t/a wertvolle Rohstoffe zurückzugewinnen³⁹.

Mit Recycling lässt sich die Abhängigkeit von Importen deutlich reduzieren. Ohne Recycling würde die steigende Nachfrage die derzeit als abbauwürdig betrachteten Lagerstätten in wenigen Jahrzehnten erschöpfen.

³⁸ Vgl. <https://www.giz.de/de/weltweit/15913.html>

³⁹ Vgl. (Umweltbundesamt, 2017)

Die Verwendung von Sekundärrohstoffen reduziert nicht nur die Erzeugungskosten (im Jahr 2007 wurde für 8,6 Mrd € Kupfer und Stahl durch Recycling gewonnen mit einer Ersparnis ggü. der Erzeugung aus Primärrohstoffen von 1,5 Mrd €), Recycling spart auch Energie wie man am Beispiel von Kupfer und Stahl deutlich erkennt: gegenüber dem Primäraufwand wurden 406 PJ eingespart, das entspricht dem jährlichen Energieverbrauch von zwei großen Braunkohlekraftwerken.

Die Energieeinsparung zeigt sich z.B. auch im Bereich Kunststoffe: Im Vergleich zu Primärkunststoffen aus Rohöl spart etwa die Nutzung hochwertiger Recyclingkunststoffe mehr als 50 Prozent Treibhausgasemissionen ein⁴⁰.

Die Voraussetzungen für Urban Mining sind sehr gut, da:

- der Prospektionsaufwand ggü. dem klassischen Abbau von geologischen Lagerstätten deutlich geringer ist,
- die anthropogenen Lager sich in der Regel deutlich näher an Wirtschaftszentren und in einer gut erschlossenen Umgebung befinden, sodass Kosten für den Transport zur Weiterverarbeitung geringer sind,
- der Wertstoffgehalt der anthropogenen Lager deutlich höher als in natürlichen Erzlager ist. So entspricht der Goldgehalt eines durchschnittlichen Mobiltelefons dem von 16 kg Golderz.

Da es vor 1972 kaum geordnete Deponien in Deutschland gab, sind in alten Deponien viele interessante Materialien zu finden. Für die Deponien der Jahre 1975 bis 2005 wird vermutet, dass dort Material mit einem Heizwert von 60 Mrd € gelagert ist und 26 Mio t Eisenschrott, 1,2 Mio t Kupferschrott und 0,5 Mio t Aluminium gehoben werden können. Außerdem wird geschätzt, dass dort 0,65 Mio t Phosphor mit einem Wert von 14 Mrd € lagern.

Literaturverzeichnis

- Atwood, D. (2012). *The Rare Earth Elements: Fundamentals and Applications*. Lexington KY: Wiley.
- Baumann, F. (2022). *Dieses Startup möchte das Recycling seltener Rohstoff voranbringen*. BasicThinking.
- Baumann, F. (2022). *Hydrovolt: Europas größte Recyclinganlage nimmt den Betrieb auf*.
- BMWi, B. f. (2019). *Rohstoffstrategie der Bundesregierung*.
- Buchert, M. (2018). Recycling von Kobalt und Lithium für die Energiewende. *HIF Resource Talk*, Öko-Institut e.V. Freiberg.
- Bundesregierung. (2020). *Fortschreibung der Rohstoffstrategie der Bundesregierung*.

⁴⁰ Vgl. (Umsicht, 2021)

- Cheisson, R., & Schelter, E. (2019, Feb 1). Rare Earth Elements: Memdeleev's bane. modern matrvcls. *Science*, pp. Vol 363, pp 489-493.
- Chinesisch-Afrikanische Partnerschaft. Das Beispiel der Demokratischen Republik Kongo. (2014). *Südwind*.
- Commission, E. (2020). Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. Luxembourg.
- Daumann, L. J. (2018). *Wirklich unzertrennlich? Seltene Erden trennen und recyceln*. GDCH.
- Dehoust, G. e. (2020). *Weiterentwicklung von Handlungsoptionen einer ökologischen Rohstoffpolitik*. Dessau-Roßlau.
- Dong, Z., & Mattocks, J. e. (2021, 10 8). Bridging Hydrometallurg and Biochemistry: a Protein-Based Process for Recovery and Separation of Rare Earth Elements. *ASC Publications*, pp. 1798-1808.
- Espinosa, D., & Tenório, J. (2006). Recycling of nickel-cadmium batteries using coal as reducing agent. *Hournal of Power sources*.
- Fischer, L. (2011). Die Rohstoffkrisen der Zukunft. *Spektrum*.
- Gielen, D., Lyons, M. (IRENA). (2022). *Critical materials for the energy transition: Rare earth elements*,. Abu Dhabi.
- IEA. (2021). *The role of critical Minerals in Clean Energy Transitions*. IEA Publications.
- Kommission, E. (2011). *MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, ..., GRUNDSTOFFMÄRKTE UND ROHSTOFFE: HERAUSFORDERUNGEN UND LÖSUNGSANSÄTZE*. Brüssel, CELEX 52011DC0025.
- Kupferinstitut, D. (2021). *Recycling von Kupferwerkstoffen*. Düsseldorf.
- Lewicka, E. e. (2021). *On the Possibilities of Critical Raw Materials Production from the EU's Primary Sources*. *Resources* 19(5) 50.
- Mende, R. (n.d.). Rückgewinnung von Lithium aus heimischen Rohstoffen mittels COOL- Prozess. TU Freiberg, Masterarbeit.
- Minke, C. e. (2021). Is iridium demand a potential bottleneck in the realization of large-scale PEM water electrolysis? *International Journal of Hydrogen Energy*, 23581-23590.
- Mischler, G. (2020, januar 23). *Technik+Einkauf*. Retrieved from <https://www.technik-einkauf.de/rohstoffe/kritische-rohstoffe/einkauf-iridium-superharter-rohstoff-der-neutronensterne-215.html>
- Mischler, G. (2022). *Einkauf + Technik*. Retrieved from Einkauf Iridium: superharter Rohstoff der Neutronensterne: <https://www.technik-einkauf.de/rohstoffe/kritische-rohstoffe/einkauf-iridium-superharter-rohstoff-der-neutronensterne-215.html>

- Neitzel, D. (2021). *Kritische Rohstoffe - der große Überblick*. Technik + Einkauf.
- Neitzel, D. (2022). BMW recycelt Nickel, Lithium und Kobalt aus E-Auto-Batterien. *Technik+Einkauf*.
- Neitzel, D. (2022). Was tun gegen die Abhängigkeit von russischen Rohstoffen? *Technik+Einkauf*.
- Neitzel, D. (2022). *Wer sind die Zulieferer für Lithium=*. Technik+Einkauf.
- Nickel recycling. (2022, August 04). Retrieved from Nickel Institute: <https://nickelinstitute.org/en/policy/nickel-life-cycle-management/nickel-recycling/>
- Pitts, M. (2011). Let's Take Better Care of our Rare Earth Elements". *New Scientist*.
- Rohstoffagentur, D. D. (2019). *DERA Rohstoffliste 2019*.
- Rohstoffagentur, D. D. (2022). *DERA Rohstoffinformationen 52*.
- S&P_Global. (2022). *The Future of Copper*. IHS Market.
- Saam, W. (2008). Chinas Griff nach Afrikas Rohstoffen. *Konrad Adenauer Stiftung, Analysen & Argumente*.
- Steinmüller, K. (2020). *Vergleich von Rohstoffstrategien von Industrieländern für metallische Rohstoffe*. Research Gate, Technical Report.
- The Hague Centre for Strategic Studies (HCSS) and TNO. (2010). *Rare Earth Elements and Strategic Mineral Policy*. The Hague.
- U.S. Department of Energy. (2011). Critical Materials Strategy.
- Umsicht, F. (2021, oktober 06). *Recycling sichert Rohstoffe für ein klimaneutrales Europa*. Retrieved from Umsicht: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2021/rohstoff-recycling.html>
- Umweltbundesamt. (2017). *Urban Mining*. Dessau Roßlau: Umweltbundesamt.